

基质深度和植被类型对屋顶绿化基质水分吸收能力的影响

陈兴武, 甘露, 尹淑霞*

(北京林业大学草坪研究所, 北京 100083)

摘要: 屋顶绿化不仅可以增加城市绿量, 缓解热岛效应, 为建筑隔热保温和降噪除尘, 其土壤基质和植被层还能截留雨水, 是城市雨水管理的新兴手段, 是城市绿化方面新的研究热点。为探索粗放式屋顶绿化的雨水截流效果, 试验于2014年夏在希腊雅典进行, 通过3种植物(高羊茅、克里特奥勒冈和千佛手)和2种基质深度(8 cm和16 cm)组合的粗放式屋顶绿化对灌溉水的吸收量来检验其水分吸收能力, 模拟其雨水截流效果。试验包括2个研究阶段, 日灌溉量分别是3.6 mm和6.0 mm。结果表明, 种植克里特奥勒冈和高羊茅的屋顶绿化, 夏季吸水能力较强, 雨水截留能力强; 种植千佛手的屋顶绿化, 水分消耗慢, 基质湿度波动小, 耐干旱, 但雨水截流能力差。

关键词: 屋顶绿化; 基质深度; 植被类型; 吸水能力; 雨水截流

中图分类号: S731.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2016)04-0624-06

Effects of plant type and substrate depth on water absorption of green roof substrate

CHEN Xingwu, GAN Lu, YIN Shuxia

(Institute of Turfgrass Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Green roofs have been reported to significantly contribute to the increase of urban green space, alleviation of heat island effect, energy saving from heat isolation by plant covers, pollution abatement and noise reduction. Moreover, the green roof's capability to manage stormwater runoff makes it a hot topic in the current research. To explore the performance of water storage by extensive green roof, the comparison of different vegetation types in different substrates including *Festuca arundinacea* Shreb, *Origanum onites* L. and *Sedum sediforme* (Lacq.) Pau., coupled with 8 or 16 cm substrate depth was conducted. Two experimental periods with shifted irrigation amount of 3.6 and 6.0 mm·d⁻¹ were applied. It was found that green roof with *Origanum* or *Festuca* had the greatest water absorption capacity during summer, which led to great runoff reduction performance, while green roof with *Sedum* would lead to the poorest runoff reduction as it was not able to consume water fast enough.

Key words: green roof; substrate depth; plant type; water absorption; runoff reduction

屋顶绿化, 又称作绿屋顶, 是对各类屋顶进行绿化造园、种植树木花卉的绿化技术的统称^[1]。屋顶绿化具有多方面的生态、经济及社会效益。其中, 屋顶绿化在雨水截流方面的表现引起了广泛注意。当降雨发生时, 屋顶绿化系统可以通过植被、基质和蓄水材料等起到截留雨水的作用。研究证实, 与传统的裸露屋顶相比, 绿屋顶可以显著减少雨水径流量(runoff quantity), 推迟初雨径流(initial runoff), 降低并推迟洪峰(peak flow)^[2-5]。在法国进行的一项研究显示, 当屋顶绿化在局部地区大面积应用时,

可以降低城市的雨洪径流量, 削弱洪峰, 一定程度上避免洪涝灾害。该研究指出, 屋顶绿化对正常规模的雨水可以起到良好的雨洪管理效果, 而当暴雨事件发生时, 屋顶绿化可以很大程度的分担节流压力, 结合其他管理手段, 共同为城市的雨洪管理做出贡献^[6]。

屋顶绿化对雨水截流的表现由多种因素共同决定和影响。其中, 基质深度是一个重要的影响因素。有研究发现, 相比浅基质, 深基质会推迟径流洪峰, 减少径流量^[7]。此外, Lee等^[7]还发现, 径流延迟和

收稿日期: 2016-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31302016)资助。

作者简介: 陈兴武, 硕士研究生。E-mail: chenxingwu16@163.com

* 通信作者: 尹淑霞, 博士, 副教授。E-mail: yinsx369@163.com

降雨前干燥天数呈正相关, 干燥天数越长, 蓄水空间越大, 相应的, 初径流延迟越久。其次, 植物类型是否对屋顶绿化的雨水截流有足够影响, 学界一直存在争议。Monterusso 等^[8]、VanWoert 等^[9]以及 Dunnett 等^[10]认为植被类型相比基质深度对屋顶绿化雨水截流的影响是微不足道的。然而, 在一份 1996 年 7 月至 12 月德国的研究报告中, Steusloff^[11]发现, 在 8 月份, 种植了紫羊茅 *Festuca rubra* 的屋顶绿化雨水径流量仅有 0.4%, 而没有植被的裸露土壤有 12.9%, 足可以见植被对水分的截留是起到正向作用的。植物蒸散决定基质内水分消耗速率, 进而影响基质蓄水的能力。Wolf 和 Lundholm^[12]确认了植被的蒸散能力不同对屋顶绿化系统水分消耗的影响。研究发现, 在最干旱的条件下, 只有肉质植物能够在两个月后依然存活, 表明了其相对较低的水分消耗速率, 这得益于其毯式的生长类型。相反, 加拿大早熟禾在所有的灌溉处理中水分消耗最快。而当地的物种, 红景天和圆叶风铃草, 在湿润和半湿润的灌溉处理下, 与加拿大早熟禾相似有较快水分消耗。

最后, 基质湿度描述了基质的水分状况, 理论上对雨水截留表现有重要影响, 然而大多数现有的研究中较少提到基质湿度这一指标。本试验选取 3 种植物(高羊茅、克里特奥勒冈和千佛手)为种植材料, 结合两种基质深度(8 cm 和 16 cm)来模拟屋顶绿化对雨水截流的影响, 分别在 2 个不同灌溉阶段监测屋顶绿化对于水的吸收量和产生的径流量以及基质湿度的变化, 来探索具有最佳雨水截流效果的屋顶绿化搭配。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验于雅典农业大学图书馆(北纬 37°59', 东经 23°42')屋顶上开展, 希腊位于地中海北部, 而雅典市位于希腊的东南角。典型的地中海气候, 夏季炎热干燥, 冬季温和、雨水充沛。全年降水量 300~1000 mm。

1.2 试验材料

以铺设屋顶绿化材料、水管、土壤基质以及种植植物的 30 个容器(210 cm×110 cm×35 cm)来模拟屋顶绿化利用激光水准仪, 将所有 30 个容器都调整为 5°倾斜(方向一致)。

容器较低一侧底部中间开孔, 作为排水口, 与 PVC 管相连, 另一端连接到接收排水的系统。容器内部模拟屋顶绿化分层结构, 先铺一层抗腐合成聚

酯纤维制成的 3 mm 厚保护毯(VLS-300, DIADEM, LANDCO LTD 雅典, 14341, 希腊), 重 0.3 kg·m⁻², 可以截留 3 L·m⁻² 的水分; 接着, 铺设厚 25 mm, 重 1.36 kg·m⁻², 且拥有 11.8 L·m⁻² 蓄水能力的蓄排水板(DIADRRAIN 25H, DIADEM, LANDCO LTD Athens, 14341, Greece); 随后, 用热增强聚丙烯制成的非织造土工布(VLF-150, DIADEM, LANDCO LTD Athens, 14341, Greece)盖在排水板上。由浮石、热处理过的粘土、沸石和葡萄渣堆肥以 65:15:5:15 的体积比混合而成的基质按照试验设计的深度均匀填充到容器中。

1.3 试验处理

基质深度和植被类型是试验的两个因素。其中, 基质深度分为 8 cm 和 16 cm 两个水平。14 个容器装填了 8 cm 的基质, 14 个容器装填了 16 cm 的基质, 而另外 2 个容器则未装填任何屋顶绿化材料和基质, 作为空白对照, 模拟一个常见的无绿化的屋顶, 研究传统屋顶和屋顶绿化之间的差异, 并且以空白组接收的径流视作降雨量。

试验所选取的 3 种植物: 高羊茅 *Festuca arundinacea* Shreb, 克里特奥勒冈 *Origanum onites* L., 以及千佛手 *Sedum sediforme* (Lacq.) Pau 分别栽种于 4 盆 8 cm 基质的容器, 4 盆 16 cm 基质的容器; 另有 2 盆 8 cm 基质容器和 2 盆 16 cm 基质容器不栽种植物作为对照, 来比较有植物覆盖的和无植物覆盖的屋顶绿化试验效果。

研究选取灌溉量为 3.6 mm·d⁻¹ (2014 年 6 月 14 日至 6 月 27 日, 共 14 d) 和 6.0 mm·d⁻¹ (7 月 10 日至 7 月 23 日, 共 14 d) 的 2 个试验阶段。其中, 6 月 15 日、6 月 20 日、6 月 21 日和 7 月 19 日分别有 6.3、2.7、5.9 以及 7.2 mm 的降雨, 其他日期均无降水发生。

1.4 测定指标

径流量(Runoff)是由翻斗式系统进行测量的。超过土壤基质及屋顶绿化材料蓄水能力的一部分雨水, 在渗透到排水层后由容器较低一侧的排水孔流出, 并进入相连接的翻斗。当翻斗内储存的水量达到一定量(预设)时, 则会完成翻转并排出整个系统。每一次翻转都会被感应式传感器(inductive proximity sensors)(IME18, SICK Vertriebs-GmbH, Willstätterstraße 30, 40549, Düsseldorf, Germany)记录, 并上传到可编程控制器(Programmable Logic Controller/PLC)(S7-1200, SIEMENS AG, Wittelbacherplatz, 80333, Munich, Germany)。可通过与 PLC 相连的电脑在线获取实时数据。翻斗系统和数

据获取的电脑软件是由 Kinematik SA (Metamorphosi, Athens, Greece)制造的。

基质湿度和温度是由埋置于土壤基质中的 Turfguard 双电极无线传感器(TORO, 8111 Lyndale Avenue, South Bloomington, MN)进行测定的。传感器每 1 h 测试并记录 1 次数据。

1.5 数据处理

论文中的数据是各处理重复的平均值。根据实验设计思路和方法,应用 Microsoft Excel 2013 制表, OriginPro8 制图, JMP® ver.8 statistical 显著性检验。

2 结果与分析

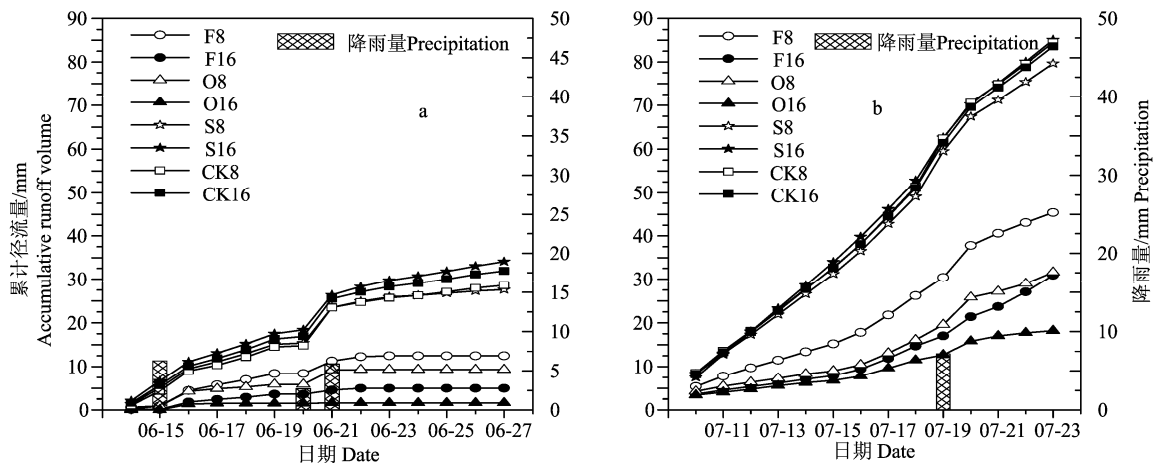
2.1 累计径流量的变化情况

累计径流量可以反映不同屋顶绿化处理在较长一段时间内的排水状况,非排则吸,排水量越少,吸水能力越强,因此可以体现相应的蓄水能力。两个试验阶段各屋顶绿化处理的累计径流量如图 1 所示。由图 1(a)可知,灌溉量为 3.6 mm·d⁻¹ 时, O16 和 F16 产生的径流量最少,其次是 O8 和 F8, S8、S16 和对照组径流量最高且比较接近。当灌溉量增加为 6.0 mm·d⁻¹ 时,所有屋顶绿化处理的径流量都显著增加,其中, O16、F16 和 O8 产生的径流量最少,其次是 F8,与第一阶段相似, S8、S16 和对照组径流量最大且比较接近。由此可见,不同灌溉量下,屋顶绿化的径流量随着灌溉量的增加而增加,

而且屋顶基质的水分吸收能力因不同植物而有较大差异,由图 1 的数据可知,种植克里特奥勒冈的屋顶基质对水分的吸收能力要略高于高羊茅,而种植千佛手的屋顶绿化,和裸露基质对水分的吸收能力相近。

2.2 基质水分总吸收比例情况

图 2 对比了各处理屋顶绿化在两个不同灌溉阶段的总吸收比例。总吸收比例=[1-总径流量/(总灌溉量+降雨量)×]100%。总吸收比例越高,表明在整个试验期间该处理吸收的水分越多,水分截流能力也就越强。数据显示,在第一个试验阶段,种植克里特奥勒冈和高羊茅的屋顶绿化在所有处理中总吸收比例最高(97.36%~81.20%),而且不同深度的基质的总吸收比例差异明显(P<0.05);而种植千佛手的屋顶绿化总吸收比例最低,和对照组接近,甚至更低。由图 2b 可以看出,第二阶段的各处理的屋顶基质的总吸收比例结果与第一阶段相似,吸收能力依次为克里特奥勒冈>高羊茅>千佛手。另外,在灌溉量增加的情况下,各处理的总吸收比例明显下降,水分截流表现减弱,这一结论和 Carter 和 Rasmussen^[13]的研究结论是一致的,当降雨量从 2.54 cm 增加到 7.62 cm,雨水截流量从 90%下降到 50%。其中种植千佛手和空白对照组下降的最多,这也说明了其吸收能力差,雨水截流能力相对较弱。

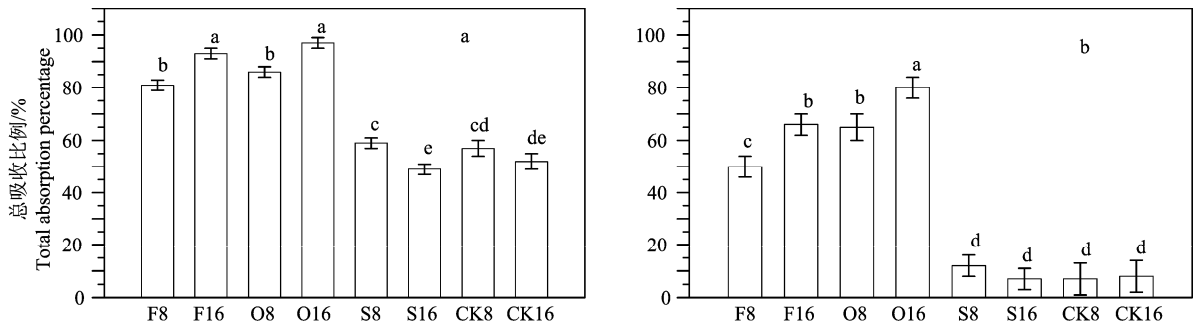


a. 06-14~06-27 日; b. 07-10~07-23 日 (F8-高羊茅*8 cm 基质; F16-高羊茅*16 cm 基质; O8-克里特奥勒冈*8 cm 基质; O16-克里特奥勒冈*16 cm 基质; S8-千佛手*8 cm 基质; S16-千佛手*16 cm 基质; CK8-对照*8 cm 基质; CK16-对照*16 cm 基质)

a. 14th June to 27th June; b. 10th July to 23rd July, 2014.(F8-Festuca*8 cm substrate; F16-Festuca*16 cm substrate; O8-Origanum*8 cm substrate; O16-Origanum*16 cm substrate; S8-Sedum*8 cm substrate; S16- Sedum*16 cm substrate; CK8-control*8 cm substrate; CK16- control*16 cm substrate)

图 1 2 个不同试验阶段屋顶绿化的累计径流量及日降雨量

Figure 1 Cumulative runoff amount of green roof plots and daily rainfall in two experimental periods

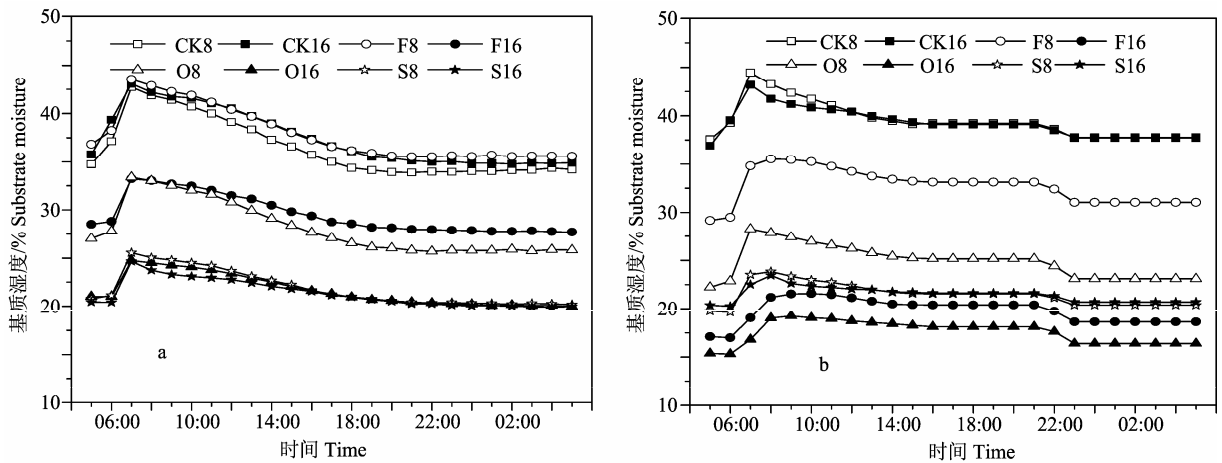


a. 第一实验阶段: 06-14 日~06-27 日; b. 第二实验阶段: 07-10~07-23 日。不同字母表示各处理间差异显著 $P<0.05$, LSD 法)

(a) 14th June to 27th June, (b) 10th July to 23rd July, 2014. Different letters above the bar indicate significantly difference ($P<0.05$, LSD)

图 2 屋顶绿化总吸收比例

Figure 2 Total absorption percentage of green roof plots

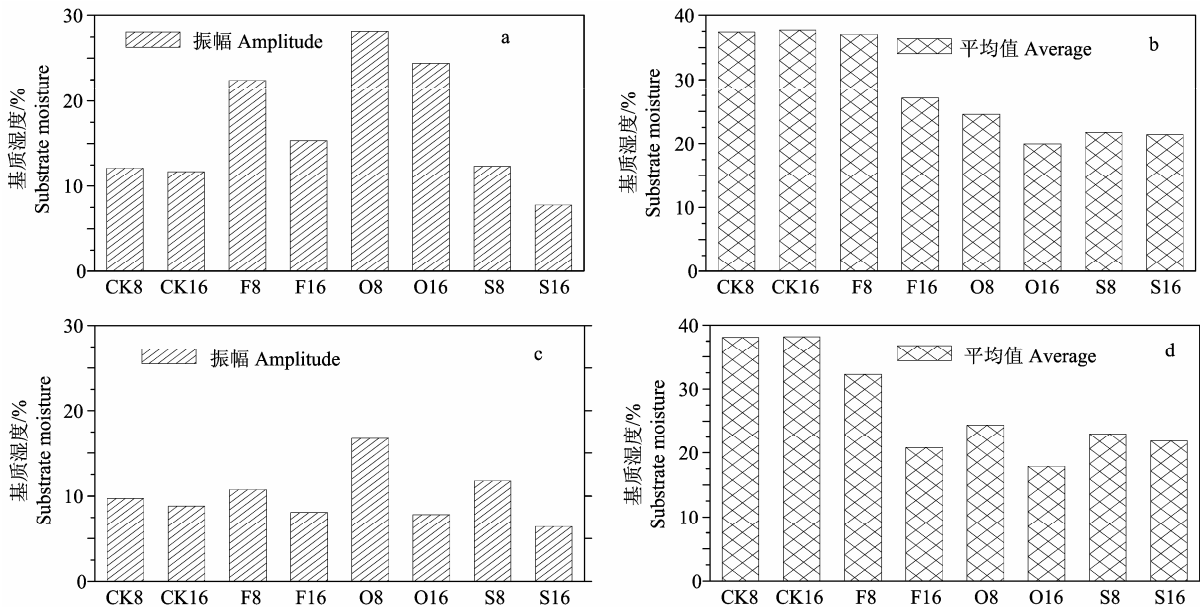


(a) 2014-06-14 5:00~06-15 5:00; (b) 2014-07-17 5:00~07-18 5:00

(a) 5.00 a.m., 14th June to 5.00 a.m., 15th June, 2014; (b) and from 5.00 a.m., 17th July to 5.00 a.m., 18th July, 2015

图 3 土壤基质湿度日变化

Figure 3 Hourly change of green roof substrate moisture



a, b: 2014-06-14~06-27; c, d: 2014-07-10~07-23

a, b: from 14th June to 27th June 2014; c&d: from 10th July to 23rd July 2014

图 4 屋顶绿化基质湿度振幅和平均值

Figure 4 Amplitude and average substrate moisture of green roof

2.3 基质湿度的动态变化情况

为了进一步地研究植被和基质深度对雨水截流表现的影响,对基质湿度的动态变化进行了分析。在每个灌溉期分别选取一个自然日,2014年6月14日5:00—6月15日5:00(图3a)和2014年7月17日5:00—7月18日5:00(图3b),来研究植物类型和基质深度对屋顶绿化基质水分动态变化的影响。这两日无降雨发生,灌溉发生于早上6:00。灌溉后,各处理的基质湿度均经过先显著上升,再缓慢下降,直至保持均衡的一个过程。且不同处理之间存在较大差异(图3)。对照组基质湿度含量常处于较高水平,且波动较大,而8 cm基质和16 cm基质之间的湿度差异不明显;F8的基质湿度水平明显高于F16;与之类似的是,O8的基质湿度水平明显高于O16;相反,在两个观测日,S8和S16的基质湿度都十分接近,并且处于所有处理中相对较低的位置。此外,对比两个观测日,可以发现,对照组和种植千佛手的4个处理组,基质湿度水平都维持在一个相对稳定的水平,分别为35%~45%和20%~25%之间;然而,种植高羊茅和克里特奥勒冈的4个处理组,在第2个观测日相同处理的基质湿度降低约有5%,这可能说明了随着气温的增加,高羊茅和克里特奥勒冈的水分蒸散量加大,进而导致基质湿度显著降低。

图4展示了2个试验阶段屋顶绿化各处理的基质湿度振幅(最大值-最小值)和平均值。其中除CK外,3种植物处理组其基质深度越深,湿度振幅和平均值都越小,这一结论和Rowe等^[14]的研究结论相一致,基质越深,持水能力越强,湿度波动越小。而不同植物之间,种植高羊茅的屋顶绿化基质湿度平均值最高,与第一试验阶段的水分总吸收比例较大的结果相统一;其次是种植克里特奥勒冈的屋顶绿化基质,但其振幅最大,这说明了克里特奥勒冈植物和土壤形成的基质层对水分的消耗速率较快,使其在试验阶段内随着灌溉量的变化而有着较大的波动变化;种植千佛手的屋顶绿化基质和种植克里特奥勒冈的屋顶绿化基质湿度平均值接近,但其振幅很小,证明其较低的水分消耗速率。此外,和CK的对比可以发现,有植被覆盖的屋顶绿化虽然降低了基质的湿度水平,但考虑到植物本身对水分的利用率,种植植物的屋顶绿化确实从整体水平上提高了水分截留能力,这一结论和Steusloff^[11]的研究结果是一致的。众所周知,如千佛手一样的肉质植物对水分的需求量较低,耐旱性强^[18],但如果从雨水截留的角度考虑,其效果较差;相反,克里

特奥勒冈和高羊茅的水分消耗速率较快,不适宜在极度干旱或缺乏基本灌溉管理的地区应用为屋顶绿化植被,因为水分的缺乏不利于其植物生长,但在气候相对湿润的地区,从雨水截留的角度出发,可以作为不错的植物选择。

3 讨论

屋顶绿化是分层的结构,当降雨发生时,植物的叶片首先会拦截一部分雨水,这部分雨水最终可能进入基质层,也有可能直接被叶片吸收,还有一部分通过蒸散作用进入大气。其次,进入基质层的雨水,会暂时蓄存在土壤孔隙中,直至超过田间饱和持水量后,向下透过过滤层进入蓄排水板。蓄排水板通过表面的蓄水凹槽承接水分,当雨水超过其蓄水能力时则沿排水孔及排水板边缘流出,产生地下径流。所有留存在基质层和蓄水槽中的水分最终会被植物吸收利用或者以蒸散的方式消耗。

通过和空白对照的对比可以看出,不同的植物类型在蒸散能力上有很大的不同,因而土壤和植物根系构成的基质层对水分的消耗速率不同,高蒸散率植物可以更快的消耗基质中的水分,为下一次蓄水做准备;相反,低蒸散率植物水分消耗慢,水分长时间储存在基质中,没有足够的空间为下一次雨水截流做准备,截留效果减弱。本研究中,千佛手与其他植物相比较,无论在8 cm还是16 cm深度的基质中,其土壤湿度波动小,说明水分消耗慢这与Wolf和Lundholm^[12]的研究结果是一致的,肉质植物的水分消耗速率比其他植物要低很多。同时,千佛手所在的屋顶绿化处理径流量最大,水分吸收比例最低,可以推测其屋顶绿化雨水截流表现比较差。而种植克里特奥勒冈和高羊茅的两个深度基质的屋顶绿化均表现出径流量小、水分总吸收比例高、土壤基质湿度波动大等特点,说明克里特奥勒冈、高羊茅在夏季水分消耗较强,对屋顶绿化雨水截留能力起到积极作用,为下一次降雨提供更多蓄水空间,水分截留表现更好。因此在能给予屋顶绿化基本灌溉管理的基础上,从雨水截留角度考虑的话,可以应用克里特奥勒冈和高羊茅为屋顶绿化植被。而作为耐旱植物的千佛手,尽管其夏季的雨水吸收能力有限,但其他季节的雨水截留能力需要做进一步研究。

另外,不同基质深度的雨水截留效果因植物不同而有差异性。Lee等^[7]的研究曾表明,基质深度越深,屋顶绿化雨水截流百分比越高,本研究中种植高羊茅和克里特奥勒冈的屋顶绿化与该结果相符,

基质越深, 水分吸收比例越高。然而种植千佛手的屋顶绿化的深基质和浅基质吸收比例无显著差异(图 2), 这可能和千佛手较慢的水分消耗相关, 需要进一步研究以证实种植千佛手的基质深浅对吸收比例和雨水截流能力的影响。与此同时, 由于房屋承载能力有限, 在选取基质深度时, 应结合实际情况。本研究中, 尽管浅基质的水分吸收比深基质要少, 但差距并不大。此外, 由于室外实验影响因素较多, 进一步的研究可以设计温室栽培实验, 模拟基质和植物对雨水的吸收情况。

4 结论

研究表明, 种植克里特奥勒冈和高羊茅的屋顶绿化, 夏季吸水快, 雨水截留能力强; 种植千佛手的屋顶绿化, 水分消耗慢, 基质湿度波动小, 耐干旱, 但雨水截流能力差。基质深度对雨水截流能力的影响因植物不同而有差异, 种植克里特奥勒冈和高羊茅的屋顶绿化基质越深, 雨水截流能力越强; 而种植千佛手的屋顶绿化与该结果并不一致, 需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 洗丽铎, 鲍海泳, 陈红跃, 等. 屋顶绿化研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(2): 36-42.
- [2] LIESECKE H J. Extensive Begrünung bei 5° Dachneigung; Ergebnisse eines vierjährigen Freilandversuchs zu Bauweisen, Vegetationsentwicklung, ökologisch wirksamer Wasserrückhaltung und entwässerungstechnisch zu berücksichtigendem Wasserabfluss[J]. Stadt und Grün, 1999, 48(5): 337-346.
- [3] HUTCHINSON D, ABRAMS P, RETZLAFF R, et al. Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA[J]. City of Portland Bureau of Environmental Services, 2003.
- [4] ROWE D B, RUGH C L, VANWOERT N, et al. Green roof slope, substrate depth, and vegetation influence runoff[C]//Proceedings of 1st North American green roof conference. Chicago: Greening Rooftop for Sustainable Communities, 2003.
- [5] 叶建军, 魏裕基, 肖衡林, 等. 初绿化屋顶对雨水截留作用研究[J]. 给水排水, 2014, 40(5): 139-143.
- [6] VERSINI P, RAMIER D, BERTHIER E, et al. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 562-575.
- [7] LEE J Y, LEE M J, HAN M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 152: 171-176.
- [8] MONTERUSSO M A, ROWE D B, RUGH C L, et al. Runoff water quantity and quality from green roof systems[J]. Acta Hort, 2004, 639: 369-376.
- [9] VANWOERT N D, ROWE D B, ANDRESEN J A, et al. Green roof stormwater retention[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(3): 1036-1044.
- [10] DUNNETT N, NAGASE A, BOOTH R, et al. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments[J]. Urban Ecosyst, 2008, 11: 385-398.
- [11] STEUSLOFF S. Input and output of airborne aggressive substances on green roofs in Karlsruhe[M]//BREUSTE J, FELDMANN H, UHLMANN O. Urban ecology. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [12] WOLF D, LUNDHOLM J T. Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability[J]. Ecological Engineering, 2008, 33: 179-186.
- [13] CARTER T L, RASMUSSEN T C. Hydrologic behavior of vegetated roofs[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(5): 1261-1274.
- [14] ROWE D B, GETTER K L, DURHMAN A K. Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(3): 310-319.